第40卷 第3期
2023年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 3
Mar. 2023

基于组合熵权RSR法的董志塬沟谷发育评价

崔 帅, 许 强, 袁 爽, 蒲川豪, 陈婉琳, 纪 续

（成都理工大学，地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，四川 成都 610059）

摘 要：黄土沟谷的发育演化进程研究对于发掘沟谷形成与土壤侵蚀的内在机理，指导黄土地区生态修复有深刻的指导意义。基于沟谷水平空间、气候、沟谷点线面特征选取10个沟谷发育程度量化指标，利用组合熵权RSR法优异的多因子综合性分档评价能力建立董志塬沟谷发育阶段分级评价模型，探究黄土沟谷的发育演化及分布规律。研究发现：(1) 基于熵权法计算归一化植被指数（NDVI）所占权重最高为16.08%，其次为沟谷密度（15.621%），两者是判断沟谷发育程度的重要指标。(2) 基于组合熵权RSR法将董志塬82条沟谷发育程度分为幼年期、青年期、壮年期和老年期，壮年期和老年期沟谷面积占比为88.48%，董志塬东部及北部发育程度较高，对于塬面侵蚀强烈。(3) 沟谷发育程度与其下伏古地貌、构造地质和黄土厚度有着高度相关性。(4) 模型方差一致性检验显著性水平 $P<0.001$，线性回归拟合优度 R^2 为0.986，评价模型表现良好。

关键词：黄土；量化指标体系；组合熵权RSR法；沟谷发育分级评价；董志塬

沟谷作为黄土地区典型的侵蚀地貌单元，在内外营力，降雨等因素作用下不断侵蚀塬面。沟谷的发育程度存在显著的差异性，研究沟谷发育的发育规律，帮助更清楚的了解黄土沟谷有组织、系统的发育和演化，综合性的量化指标也利于多角度认识沟谷的纵向、横向和水平方向的特征，从而帮助精准且有效的实施固沟保塬工程，减少脆弱的地质环境对发展的限制。本文基于组合熵权RSR对董志塬沟谷发育进行分级评价，帮助我们更正确清晰的认识沟谷的发育，为针对性的减缓水土流失和生活生产的安全提供参考依据。

黄土沟谷评价研究主要以侵蚀类型分区以及地貌类型分类为主[1]。基于侵蚀类型可分为宏观的黄土沟谷侵蚀分区[2-3]以及微观的沟谷侵蚀发育进程研究[4]。而从地貌类型的角度出发，科学的沟谷地貌认知及其分类体系是探讨黄土沟谷发育过程的重要基础[5-6]。长期以来，在DEM数据的支撑下，黄骁力[7]、王崔林[8]、周毅等[9]、李晨瑞[10]和景可[11]基于长度、宽度、密度、分支比、网络结构（如树枝状结构）等不同指标对沟谷的形态特征、空间格局、分布规律进行了深入的研究，其主要研究了沟谷在水平方向上的特征以及分异情况。何雨等[12]、陈传康[13]、严宝文等[14]和袁爽等[15]依据定性描述或半定量的方法对沟谷形态进行表述，从不同的角度，微观和宏观不同尺度对黄土沟谷体系进行了研究，基本上将沟谷系统分为细沟、浅沟、切沟、冲沟、干沟和河沟等类型。选择合适的沟谷发育量化评价参考指标是综合建模分级评价的关键因素，目前对于沟谷量化评价指标的研究已经取得了一定的成果，但大都忽略了沟谷的层次性以及系统性。严宝文等[14]利用高程积分曲线模型将单一沟谷分为幼年期、壮年期和老年期；李晨瑞[10]选取多指标建立了有层次、系统性的评价体系将黄土高原沟谷发育程度分为了8个级别，考虑了沟谷的系统性和层次性来选取量化指标，但未将沟谷集合作为评价对象。熊礼阳[1]认为流域由若干条沟谷组成，各条沟谷的发育都不是独立的，其物质能量，梯度变化等通过径流点的串联来实现有机连接，将一个沟谷集合作为研究对象，但未建立综合量化评价模型。

本文从沟谷点线面特征、气候和水平空间角度系统性选取评价指标，并基于组合熵权RSR法建立综合评价模型，将董志塬82个沟谷集合划分为4个

收稿日期：2022-08-02； **修订日期**：2022-10-01
基金项目：国家自然科学基金重大项目(41790445)
作者简介：崔帅(1999-)，男，硕士研究生，研究方向为地质灾害. E-mail: 1458069577@qq.com
通讯作者：许强. E-mail: xq@cdut.edu.cn

不同的发育阶段，为固沟保塬等工程的开展提供参考依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省东部庆阳市境内(图1)，包括33个乡镇，南北纵向跨度100 km，东西横向跨度46 km，面积约2835 km²，其中，塬面面积968.48 km²，是黄土高原最大的一块塬面，号称“天下黄土第一塬”。研究区气候为大陆性半干旱气候，土壤为黑垆土和黄绵土，垂直节理发育，成土母质以黄绵土为主，厚度在50~200 m，塬心最厚，边缘较薄。黑垆土有机质含量丰富，土壤较为肥沃，黄绵土虽然有机质含量较低，但可耕性良好，且塬面地势平坦，研究区土地资源优越，农业发达。研究区呈现中间稍高，南北低的地势格局，腹地西峰区附近海拔1400 m，北端驿马镇一带海拔1300 m，南部和盛镇一带海拔仅1200 m，塬面周围受到冲沟切蚀呈树枝状和锯齿状，沟谷发育且逐步侵蚀塬面，为陇东黄土塬侵蚀地貌。研究区黄土覆盖率高，厚度大，沟谷疏密相间，延伸各异，沟谷发育具有高度可研性[16]。

1.2 数据与方法

1.2.1 研究思路 本研究分为3个阶段：(1) 原始数据的准备与解译；本研究的DEM、Landsat 8、谷歌高清卫星影像(分辨率1 m)、降雨量以及路网均为2020年数据；基于ArcGIS 10.3软件，采用人机交互目视与ArcToolbox进行解译。(2) 选取沟谷点线面特征、气候和水平空间指标进行单一指标量化评价。(3) 基于组合熵权RSR法对董志塬沟谷发育进行分级评价，并验证模型的准确性。

1.2.2 参数选取 在已有研究的基础上[8,10,17-20]，依据科学性原则、敏感性原则和可实现性原则选取了10个参考指标，包含了正向因子：边界维数、沟谷密度、地表切割深度、平均坡度和月平均降雨，其量化结果值越大代表沟谷发育程度越高(如表1)；负向因子：主沟支沟比、土地利用综合指标、主沟纵降比、归一化植被指数(NDVI)和圆度率，其数值越小，代表发育程度越高(表2)。这些参考指标从气候、水平空间、沟谷点线面特征等不同的角度对沟谷的发育程度进行评价。

上述指标均通过ArcGIS 10.3软件进行计算，得到各项指标在整个董志塬的分异图。然后，基于以表格显示分区统计工具(Zonal Statistics As Table)统计各量化指标数值在各个沟谷沟沿线区域内的平均值，以该平均值作为沟谷发育程度的评价依据。

1.2.3 熵权法 考虑到不同指标对于沟谷发育程度的描述存在差异性，研究采用熵权[21]确定指标的权重。熵权法的思路是根据指标变异性的大小来确定其客观权重。其求解步骤如下：

(1) 数据标准化

首先将各个指标进行去量纲化处理。假设给

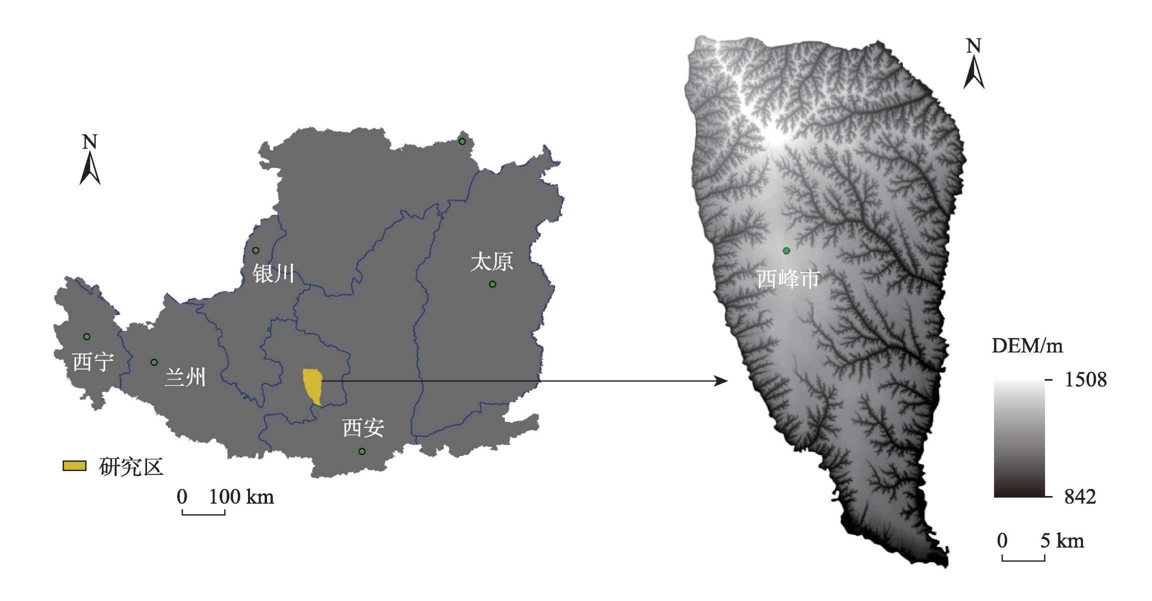


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

表1　沟谷发育评价正向指标

Tab. 1　Positive indicators for gully development evaluation

指标名称	计算公式	解释	指标意义
边界维数	$D=\frac{2(\ln N-C)}{\ln M}$	M为沟谷面积；N为沟谷沿线周长；C为沟谷周长	反映水平方向上沟谷空间展布的复杂程度和沟谷的发育程度。指标值越大，说明局部沟谷与整体沟谷网络的相似程度越高，沟谷形态结构越复杂，发育程度越高。
沟谷密度	$D_l=\frac{\sum_{i=1}^{n} l_i}{A}$	D_l为沟谷密度；l_i为流域内各条沟谷的长度；A为流域面积	反映沟头前进及沟谷侵蚀发育程度的重要指标。指标值越大，说明沟头前进程度越大，即沟谷生长延伸程度越大，发育程度越高。
地表切割深度	$G_i=H_{mean}-H_{min}$	G_i为地表切割深度；H_{mean}为地面某点一定邻域范围内的平均高程；H_{min}为该点同一邻域范围内的最低高程	直观反映了沟谷下切发育程度和地表被侵蚀切割的程度。指标值越大，地表侵蚀切割越剧烈，沟谷下切发育程度越高。
平均坡度	$slope=\arctan\sqrt{f_x^2+f_y^2}\times\frac{180}{\pi}$	f_x为x方向的高程变化率；f_y为y方向的高程变化率	在一定程度上反映沟谷地貌的发育程度。沟谷发育初期，沟谷发育以下切为主，指标值逐渐增大，随着沟谷发育程度的增加，沟谷在深切的同时也在横向展宽，指标值反而有所下降。
月平均降雨	$R_i=\frac{R_A}{12}$	R_i为月平均降雨；R_A为年总降雨	气候影响因素之一，降雨的多少一定程度上影响水流侵蚀的剧烈程度。

表2　沟谷发育评价负向指标

Tab. 2　Negative indicators for gully development evaluation

指标名称	计算公式	解释	指标意义
主沟支沟比	$R=\frac{L_0}{L}$	R为主沟支沟比；L_0为主沟谷长度；L为沟谷总长度	从沟谷长度的角度反映沟谷系统中支沟的发育程度。指标值越小，沟谷系统中支沟发育越明显，说明沟谷系统整体发育程度越高。
土地利用程度综合指标	$L_a=100\times\sum_{j=1}^{n}A_i\times C_i$	L_a为土地利用程度综合指数；A_i为第i级的土地利用程度分级指数；C_i为第i级土地利用程度分级面积百分比	是针对一个具体年份内所有土地利用类型整体反映的土地利用集约化程度。通过对土地利用程度的分级，量化人类活动对于土地系统的影响程度，定量地描述该地区土地利用的综合水平和变化趋势，是衡量指定区域内土地利用情况的一个重要指标。
主沟纵比降	$J=\frac{H_s-H_0}{l}$	J为主沟道纵比降，H_s为主沟道出水口点的高程；H_0为主沟道沟头点的高程；l为主沟道长度	反映沟谷整体侵蚀势能，是描述沟谷在垂直方向上侵蚀发育程度的重要指标。指标值越小，说明沟谷的侵蚀能量越低，沟谷越趋近于稳定的宽谷，发育程度越高。
归一化植被指数	$\mathrm{NDVI}=\frac{NIR-R}{NIR+R}$	NIR为近红外波段的反射值；R为红光波段的反射值	反映土地覆盖植被状况的一种遥感指标，定义为近红外通道与可见光通道反射率之差与之和的商。
圆度率	$e_i=\frac{4\pi S_i}{C_i}$	e_i为圆度率；S_i为沟谷面积；C_i为沟谷沿线长度	反应水平方向上沟谷接近圆的程度，其值越接近1，则越接近圆，其发育程度越低。

定了p个指标：

$$X_i=\{x_1,x_2,x_3,\cdots,x_p\} \quad (1)$$

假设各指标标准化后的值为$Y_1,Y_2,Y_3,\cdots Y_p$，那么：

$$Y_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_i)}{\max(X_i)-\min(X_j)} \quad (\text{正向指标}) \quad (2)$$

$$Y_{ij}=\frac{\max(X_i)-X_{ij}}{\max(X_i)-\min(X_j)} \quad (\text{负向指标}) \quad (3)$$

(2) 求各指标在各方案下的比值

第j项指标在第i个方案中占该指标的比重，即计算该指标的变异大小。

$$P_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}Y_{ij}}, \quad (i=1,\cdots,n;j=1,\cdots,p) \quad (4)$$

(3) 求各指标的信息熵

根据信息论中信息熵的定义，一组数据的信息熵为：

$$E_j=-\ln(n)^{-1}\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\ln P_{ij} \quad (5)$$

式中：$E_j\geqslant 0$，若$P_{ij}=0$，则定义$E_j=0$。

(4) 确定各指标的权重

$$w_j=\frac{1-E_j}{k-\sum E_j}, \quad (j=1,2,\cdots,p) \quad (6)$$

式中：k 为指标个数，即 $k=p$。

1.2.4 秩和比综合评价法 秩和比综合评价法(RSR法)是一种将古典参数统计和近代非参数统计进行结合，并融其各自优点于一身的统计分析方法。秩和比综合法根据计算的无量纲统计量RSR进行分档评价，避免一般评价方法局限性，运用多个指标对多个单位进行评价，具有综合性和系统性，使评价变得客观准确。

其计算步骤如下：

(1) 列出原始数据表

列出原始数据表。假设有 n 个待评价样本，p 项评价指标，形成原始指标数据矩阵：

$$X=\begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{1n} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \tag{7}$$

式中：x_{ij} 表示第 i 个样本第 j 项指标的数值。

(2) 计算秩值

对评价指标按其指标值的大小进行排序，得到秩次 R，用秩次 R 来代替原来的评价指标值。研究选用非整秩法进行编秩，结果建立各指标的秩次数据矩阵。

$$R=\begin{pmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{1n} & \cdots & R_{np} \end{pmatrix} \tag{8}$$

式中：R_{ij} 表示第 i 个样本第 j 项评价指标的秩次。

对于正向指标：

$$R_{ij}=1+(n-1)\frac{X_{ij}-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{9}$$

对于负向指标：

$$R_{ij}=1+(n-1)\frac{X_{\max}-X_{ij}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{10}$$

式中：$X_{\max}=\max\left(X_{1j}, X_{2j}, \cdots, X_{nj}\right)$；$X_{\min}=\min\left(X_{1j}, X_{2j}, \cdots, X_{nj}\right)$

(3) 计算秩和比RSR值及排名

在一个 n 行 p 列矩阵中，RSR的计算公式为：

$$\mathrm{RSR}_i=\frac{1}{n\times p}\sum_{j=1}^{p}R_{ij} \tag{11}$$

式中：$i=1, \cdots, n$；$j=1, \cdots, p$，R_{ij} 表示第 i 行第 j 列元素的秩。

赋予不同指标权重则计算加权秩和比为WRSR，其公式为：

$$\mathrm{WRSR}_i=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{p}W_i R_{ij} \tag{12}$$

式中：W_i 表示第 j 个评价指标的权重，满足 $\sum_{j=1}^{p}W_j=1$。

(4) 确定RSR的分布

将RSR值按从小到大顺序排列，计算出各组频数、累计频数、秩次 R 以及平均秩次 $\bar{R}$ 以及向下累计频率 $\bar{R}/n\times100\%$，最后一项用 $(1-1/4n)\times100\%$ 修正，查询百分数与概率单位对照表得到概率单位Probit值。

(5) 基于SPSS软件计算回归方程，得到拟合方程。

(6) 据各分档排序情况下概率单位Probit值，按照最佳分档原则对评价对象进行分档归类。分档数由研究者根据实际情况决定。

1.2.5 模型准确性验证 方差齐性检验[22](Homogeneity of Variance Test)是数理统计学中检查不同样本的总体方差是否相同的一种方法。其基本原理是先对总体的特征作出某种假设，然后通过抽样研究的统计推理，对此假设应该被拒绝还是接受作出推断。常用方法有Hartley检验、Bartlett检验、修正的Bartlett检验。研究进行方差一致性检验(Bartlett检验)检验模型的准确性。

线性回归分析[23]所得的 R^2 代表曲线的拟合程度，其值越接近于1代表拟合程度越好。方差一致性检验(Bartlett检验)要求各档差异具有统计学意义。VIF值用于验证模型是否存在共线性问题，VIF值小于10或5，则模型各指标之间不存在共线性问题。

2 结果与分析

2.1 数据解译与指标计算

本文使用ArcGIS 10.3软件基于2020年的谷歌高清卫星影像(分辨率1 m)目视解译董志塬地区82条沟谷水系网络以及沟谷沟沿线(图2)。

黄土高原上沟谷存在纵向、横向和垂向3种侵蚀方式，沟头的溯源侵蚀，沟坡的侧蚀以及下切侵蚀。选取的10个指标中，地表切割深度以及主沟纵降比反映了整个沟谷垂向的下切侵蚀的程度；圆度率、边界维数在一定程度上反映了沟谷水平方向上的发育水平。其他指标从气候、水平方向的几何复

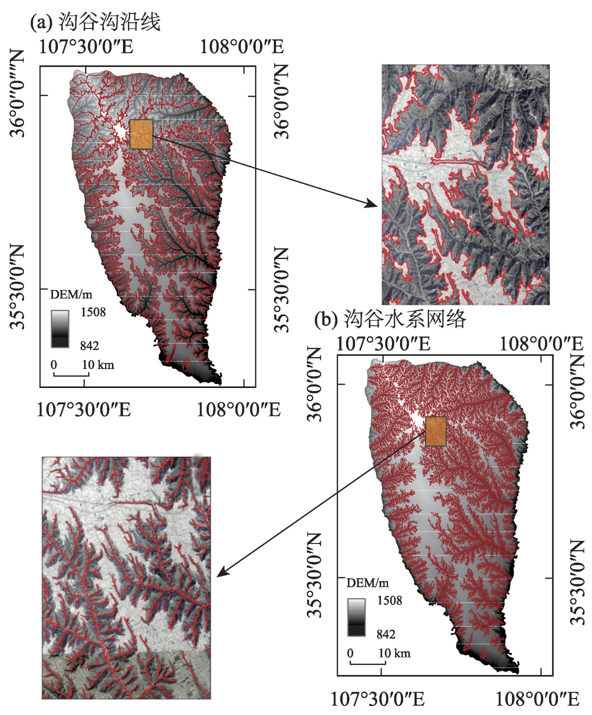


图2　董志塬沟谷原始数据解译

Fig. 2　Interpretation of raw data of Dongzhi Loess Plateau Gully

杂度和植被等角度进行评价。

使用ArcGIS 10.3对所选取的指标计算得到各沟谷各指标的平均值作为沟谷发育程度评判依据。将各指标数值赋值于各沟谷，得到沟谷发育程度分异图（图3，图4）。正向指标中，平均坡度在一定程度反映沟谷下切的程度，其值在东部及北部最大达到24.5°，西部南部则为18°左右；边界维数从水平空间描述沟谷的几何形状的复杂度来评价沟谷的发育程度，北部和东部地区边界维数在1.3~1.35，西部和南部在1.15~1.25；地表切割深度反应沟谷下切发育程度和地表被侵蚀切割的程度，东部地区切割值最大在210~260 m，其余地区在90~210 m；降雨作为黄土地区主要水源，决定了径流量的大小，整个董志塬降雨差距较小，沟谷平均月降雨量均在45.5~49.5 mm；沟谷密度反映沟头前进及沟谷侵蚀发育程度，东部和西部值较大，集中在5~6 km·km^{-2}，北部集中在3~5 km·km^{-2}。负向指标中，主沟支沟比从沟谷长度的角度反映沟谷系统中支沟的发育程度，东部和北部值较小为0~0.1，西部和南部在0.1~0.5；主沟纵降比在垂直方向上反映侵蚀发育程度，东部和北部大部分地区处于0~0.2，西南部和南部处于0.2~0.8；圆度率反映水平方向上接近圆的程度，东部和西北部沟谷沟沿线最不接近圆，在0~0.12，北部在0.24~0.48最接近圆；NDVI反映植被覆盖的状况，其值越高代表植被覆盖越好，东部集中于0.28~0.33，北部集中于0.23~0.28，南部和西部部分地区在0.33~0.4；土地利用程度综合指标评价了土地利用的集约化程度，也在一定程度上反映了植被的分布趋势，东部和西部绝大部分都在240~275，北部则落在205~240。

正向指标东部和北部计算值比西部和南部较大，负向指标显示东部和北部计算值比西部和南部较低，依据单个指标，董志塬沟谷发育程度趋势大致为偏向东侧及北侧沟谷发育程度较高，偏向西侧及南侧沟谷发育程度较低。

2.2　董志塬沟谷发育程度分级评价

本研究中，使用熵权法计算出所选取的10个指标的权重（图5）。其中，NDVI所占权重最大为16.08%，平均坡度所占权重最小为4.823%，其余指标权重分别为分形维数的权重为13.222%、沟谷密度的权重为15.621%、地表切割深度的权重为

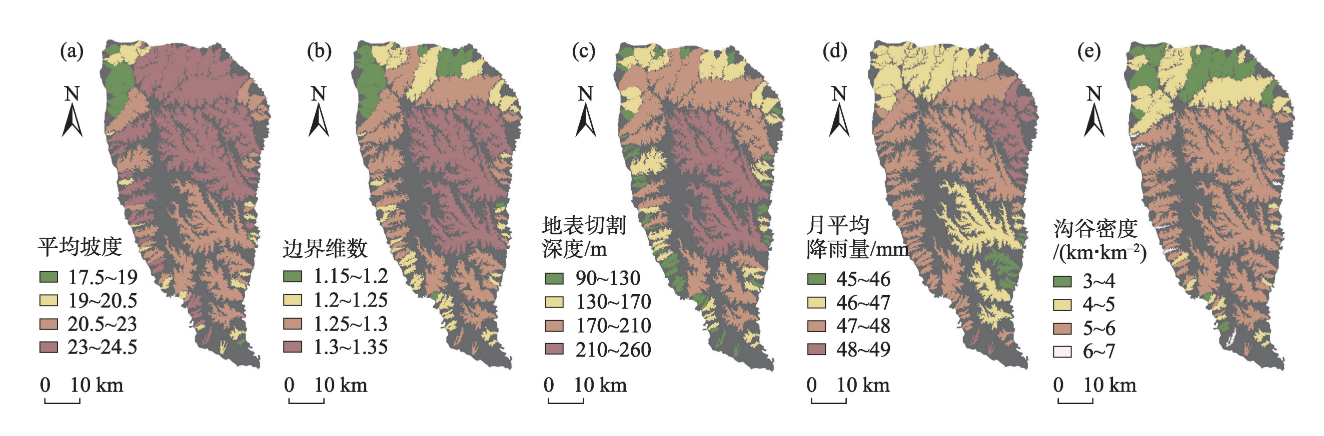


图3　沟谷发育正向指标赋值

Fig. 3　Gully development positive indicator assignment

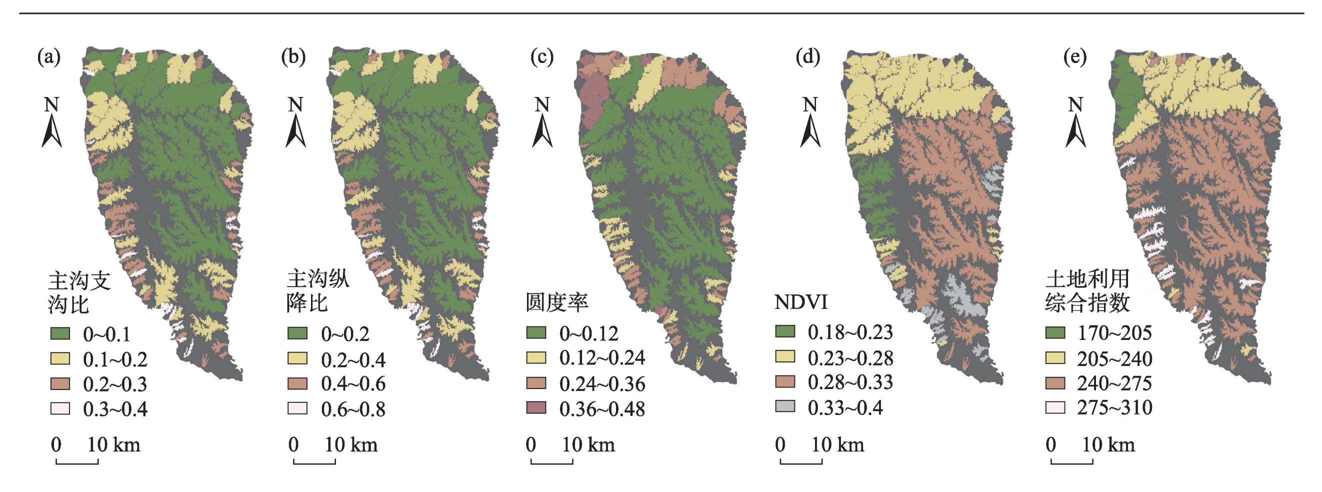


图4 沟谷发育负向指标赋值

Fig. 4 Gully development negative indicator assignment

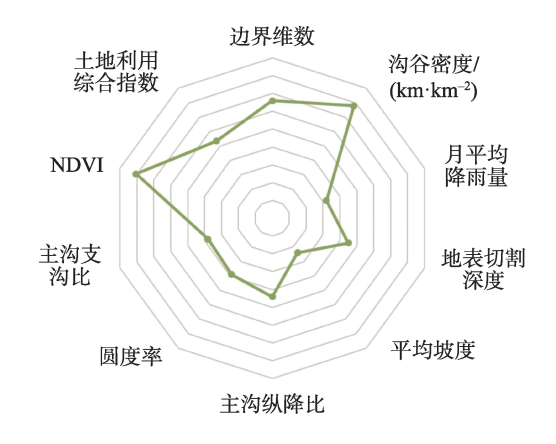


图5 沟谷发育程度评价指标权重

Fig. 5 Weighting of indicators for evaluating the degree of gully development

8.997%、降雨的权重为6.372%、圆度率的权重为7.766%、主沟纵比降(1/1000)的权重为8.835%、主沟支沟比的权重为7.609%、土地利用综合指数的权重为10.676%。

计算得到的每条沟谷各指标的RSR值,利用插值法参考百分数与概率单位对照表,得到其相对应的Probit值。其中RSR临界值(拟合值)为根据对应的Probit值代入拟合方程中求解得到。依据每个沟谷的拟合RSR值对应的Probit值从大到小进行排列分档评价,百分位数临界值和Probit临界值根据分档水平数量而变化,该两项是固定值且完全一一对应(表3)。

基于组合熵权RSR法将董志塬沟谷发育分为4个阶段:幼年期、青年期、壮年期和老年期(图6,表3)。沟谷的溯源侵蚀主要将沟谷拉长,下蚀则是加深沟谷,侧蚀从水平方向上展宽沟谷。董志塬北部沟谷多为壮年期,面积占比达49.06%,水平方向上的发育空间十分受限,侧蚀及溯源侵蚀作用较弱,但通过地表切割深度和主沟支沟比判断,整体在垂向上的下蚀作用仍有较大的发育空间。幼年期沟谷占比0.63%,处于发育的初期,各项指标都有很大的发育空间。青年期占比10.89%,沟谷在水平方向和垂直方向上均有较大的发育空间和发育潜力。老年期占比39.42%,沟谷各项指标都表明沟谷水平扩张和下切发育较完备,整体沟谷形态较为复杂[24-25]。

2.3 线性回归分析及方差一致性检验

基于SPSS软件进行线性回归分析和方差一致性检验,模型表现良好(表4):(1)对于变量共线性表现,VIF全部小于10,因此,模型没有多重共线性问题;(2)线性依赖于其未知参数的模型比非线性依赖于其未知参数的模型更容易拟合,而且产生估

表3 董志塬沟谷发育阶段分级

Tab. 3 Stages of development of the Dongzhi Loess Plateau Gully classification

发育阶段	百分位临界值	Probit	秩和比临界值(拟合值)	频数	面积/km²	面积占比
幼年期	<6.681	<3.5	<0.3106	5	10.04	0.63%
青年期	6.681~50	3.5~5	0.3106~0.4692	36	177.61	10.89%
壮年期	50~93.319	5~6.5	0.4692~0.6277	35	799.58	49.06%
老年期	>93.319	>6.5	>0.6277	6	642.44	39.42%

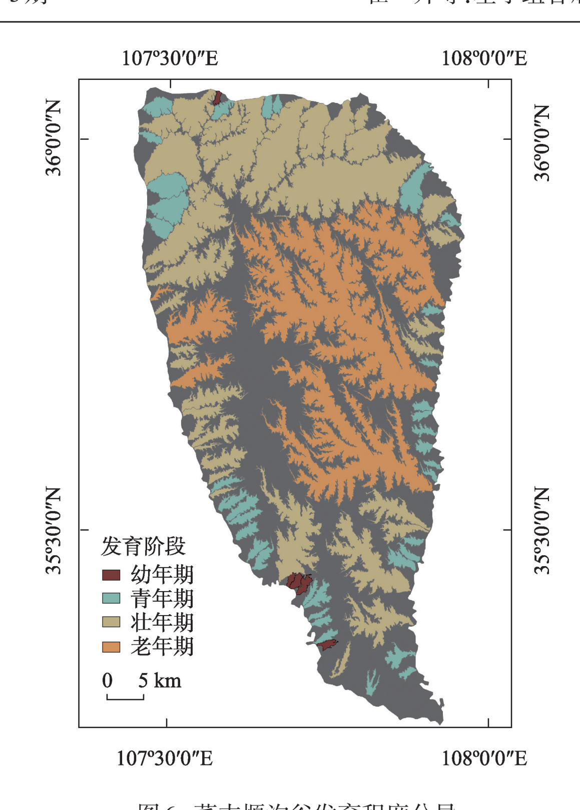


图6　董志塬沟谷发育程度分异

Fig. 6　Variation in the degree of development of the Dongzhi Loess Plateau Gully

计的统计特性也更容易确定。沟谷发育评价指标的RSR值拟合方程 y=−0.059+0.106×Probit，模型的拟合优度 R^2 为0.986，模型表现较为优秀；(3) 从方差一致性检验(Bartlett检验)的结果分析可以得到，显著性水平 $P<0.001$，水平呈现显著性，拒绝了回归系数为0的原假设，模型基本满足要求。

3　讨论

基于熵权法计算得到权重最高的两个指标为NDVI(16.08%)和沟谷密度(15.621%)，其大小是判断沟谷发育程度的重要依据。植被极大程度上影响了土壤侵蚀，其减少水土流失的机理主要为：(1) 冠层减弱雨滴的一定势能和动能；(2) 落叶调节表面径流；(3) 影响土壤降水入渗[26]；(4) 根系可提高土体抗侵蚀和抗剪强度，黄土坡面主要以均质土固结为特点，植物根系与土壤间的静摩擦阻力是决定根系提高土壤抗剪强度增量的主要因素[26-27]。解明曙[28]的研究表明随着林龄的增长，其根系对于土体抗剪强度提高越明显(表5)。植被减少水土流失的同时，土壤侵蚀也影响植被的发育[29]。土壤侵蚀是旱地和生态系统退化的最重要驱动力[30]，并严重干扰植物群落发展和植被演替过程，从种子形成开始，影响整个生长阶段，对于种子活力、扩散、发芽、幼苗建立，植物群落结构和植被空间分布均造成负面影响。例如，土壤侵蚀通过减少土壤养分和水分来影响种子的正常发育，导致胚胎形成失败和种子活力丧失，水土流失严重地区的植物种子活力明显低于土壤稳定区[31]。植被覆盖于土壤侵蚀之间存在互馈作用，Zhou等[32]基于气候变化、生态压力因素和人类活动开发了一个估算植被覆盖和土壤侵蚀的模型，土壤侵蚀与植被覆盖的回归表明，一年内植被覆盖度增加1%，可以减少土壤侵蚀456 t·km^{-2}·a^{-1}，当植被覆盖率约为52%时，土壤侵蚀趋于零[33]。

田剑等[34]将黄土高原地区输沙模数与沟谷密度线性拟合，得到沟谷密度与输沙模数之间存在较强的相关性(图7)，沟谷密度是反应沟头前进及沟谷侵蚀发育程度的重要指标，指标值越大，说明沟头前进程度越大，即沟谷生长延伸程度越大，发育程度越高。总侵蚀和非表层土侵蚀主要受沟谷密度变化控制，沟谷密度反过来又受地形因子和NDVI的控制[35]。沟谷密度的大小受多方面因素影响：(1) 黄土高原的地形发育特征受晚新生代以来的新构造运动控制形成。黄土高原基本上处于以垂直方向差异性运动为主的新构造运动区域内，控制着全高原区的地貌骨架发育过程和发展方向，以及水系的发育；(2) 董志塬地区降雨是径流的主要来源，年降雨量虽然小但集中于7—9月，降雨作为黄土地区侵蚀重要外力的同时又促进了植被的发育减少

表4　方差一致性检验及线性回归分析

Tab. 4　Consistency of variance test and linear regression analysis

	非标准化系数		标准化系数	t	P	VIF	R^2	调整 R^2	F
	B	标准误	*Beta*						
常数	−0.059	0.007	–	−8.173	0.001	–	0.986	0.986	5567.72
Probit	0.106	0.001	0.993	74.617	0.001	1			

注：B表示自变量与因变量负相关；*Beta*为标准化系数；VIF表示检验模型是否呈现共线性；R^2代表曲线回归的拟合程度；P代表显著性水平；t为T检验结果；–表示无数据。

表5 林龄与根系提高土的抗剪强度的关系

Tab. 5 Relationship between the age of the forest and the ability of the root system to increase the shear strength of the soil

林龄/a	6~10	10~19	20~29	30~40	> 40
提高土的抗剪强度/kPa	0.04	0.08	0.13	0.15	0.18

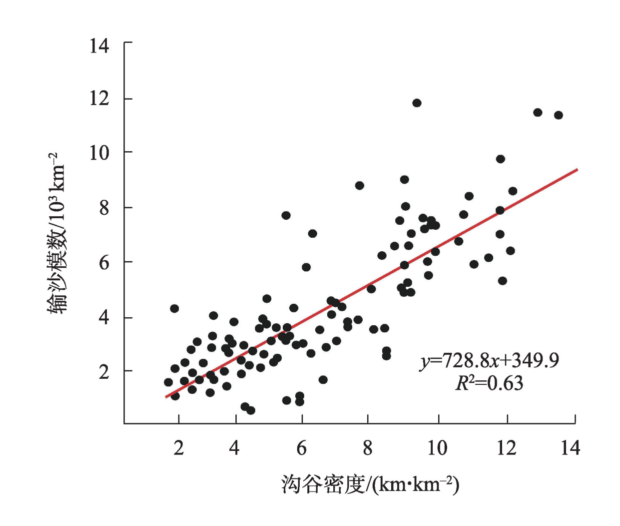


图7 沟谷密度与输沙模数关系

Fig. 7 Relationship between gully density and sand transport modulus

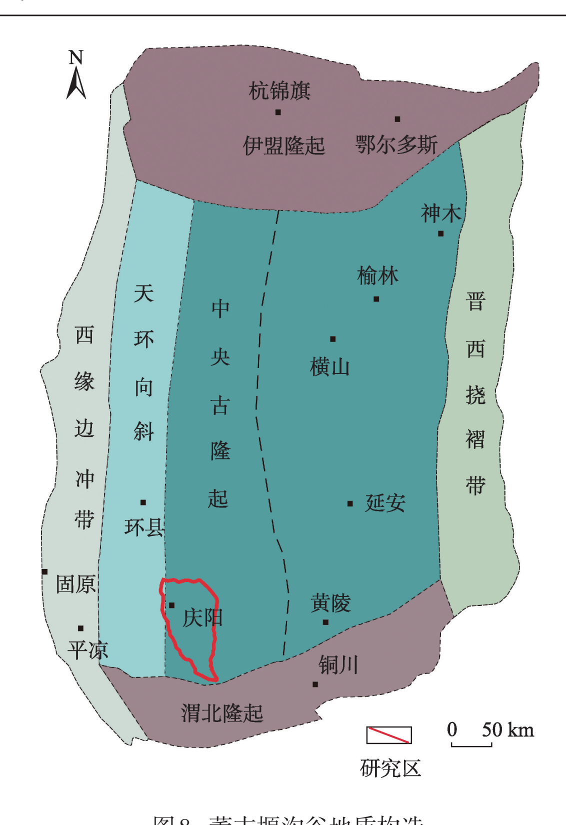


图8 董志塬沟谷地质构造

Fig. 8 Geological formations of the Dongzhi Loess Plateau Gully

水土流失[34]。

董志塬沟谷发育程度各异，其下伏构造地质、黄土厚度和节理优势走向从根本上决定了其差异性。董志塬位于陇东盆地的中部、鄂尔多斯盆地的西南部，属华北克拉通的次级构造单元。地质构造导致了研究区在接受黄土堆积的同时构造侵蚀也在不断加强，其对沟谷侵蚀发育、土壤侵蚀等的影响显著[8,36]：(1) 构造运动造成地面整体抬升与下降导致的侵蚀基准面差异影响了研究区侵蚀空间条件发展，研究区处于鄂尔多斯盆地的中央古隆起南部与西部的边缘，北部为伊盟隆起，西部为天环向斜，隆起构造内部上升差异很小，但通常核部上升幅度最大，边缘上升相对较小，造就了研究区东高西低，北高南低的下伏古地貌格局，北部及东部侵蚀基准面高，沟谷发育程度也越高(图8)；(2) 研究区下伏古地貌格局造就了研究区土壤覆盖东薄西厚，南厚北薄的布局分异[36](图9)。黄土堆积越厚，其残塬占比越小，沟谷发育程度越低[37]，同时，沟谷的发育也降低了沟谷周围的土壤质量，进一步加剧侵蚀退化[38]；(3) 下伏基岩和黄土体内部由于构造地质作用发育大量的构造节理和裂隙。研究区存

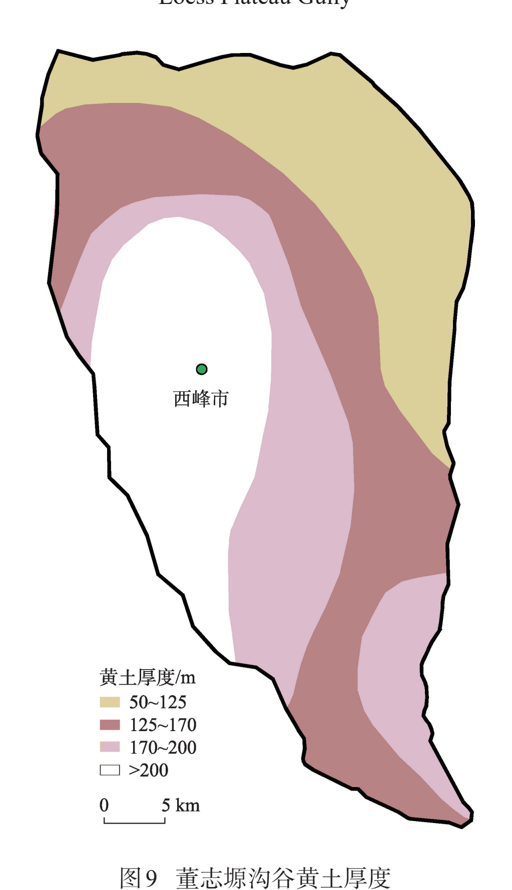


图9 董志塬沟谷黄土厚度

Fig. 9 Loess thickness of the Dongzhi Loess Plateau Gully

在3组近正交的节理系统:N-S与E-W、ENE-WSW与NNW-SSE、NNE-SSW与WNW-ESE,研究区沟谷水系的优势走向为N-S与E-W、NE-SW与NW-SE两组近乎正交的沟谷水系走向,这与研究区N-S与E-W和NNE-SSW与WNW-ESE两组节理走向几乎一致,表明构造运动引起的节理裂隙控制着沟谷水系的发育[8,39]。

4 结 论

本文基于遥感影像解译并选取多角度描述沟谷发育程度的量化指标,建立组合熵权RSR模型对董志塬沟谷发育程度进行分级评价,采用方差一致性检验和线性回归分析验证模型的可靠性。最后分析董志塬沟谷发育的差异,为开展针对性的水土保持提供参考依据。

(1) 基于熵权法计算各指标权重,归一化植被指数(NDVI)和沟谷密度是评价董志塬沟谷发育程度最敏感的两个指标,植被指标是沟谷侵蚀程度的重要评判依据,也是影响水土流失的主要因素。

(2) 基于组合熵权RSR法建立沟谷分级评价模型,发现董志塬北部及东部沟谷的发育程度较高,对塬面的蚕食严重;南部及西部沟谷密集,但发育程度不高;处于壮年期和老年期的沟谷面积占比达88.48%,沟谷地貌对于董志塬塬面的侵蚀作用强烈,进行固沟保塬工程迫在眉睫。

(3) 董志塬沟谷发育的差异与其构造地质、优势节理走向和黄土厚度密不可分。董志塬东高西低,北高南低的下伏古地貌格局,北部及东部侵蚀基准面高,黄土堆积厚度也越厚,沟谷发育程度越高;沟谷水系优势走向与N-S与E-W和NNE-SSW与WNW-ESE两组构造节理几乎一致,表明节理裂隙控制着沟谷发育。

参考文献(References)

[1] 熊礼阳, 汤国安. 黄土高原沟谷地貌发育演化研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 816-826. [Xiong Liyang, Tang Guo'an. Research progresses and prospects of gully landform formation and evolution in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(4): 816-826.]

[2] 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J]. 地理学报, 1956, 22(3): 201-222. [Luo Laixing. A tentative classification of landforms in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 1956, 22(3): 201-222.]

[3] 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训[J]. 科学通报, 1955, 6(12): 15-21, 14. [Huang Bingwei. Lessons learned from the preparation of soil erosion zoning maps in the middle reaches of the Yellow River basin[J]. Chinese Science Bulletin, 1955, 6(12): 15-21, 14.]

[4] 袁宝印, 巴特尔, 崔久旭, 等. 黄土区沟谷发育与气候变化的关系(以洛川黄土塬区为例)[J]. 地理学报, 1987, 42(4): 328-337. [Yuan Baoyin, Bartel, Cui Jiuxu, et al. The relationship between gully development and climatic changes in the Loess Yuan Region: Examples from Luochuan, Shanxi Province[J]. Acta Geographica Sinica, 1987, 42(4): 328-337.]

[5] 胡刚, 伍永秋. 发生沟蚀(切沟)的地貌临界研究综述[J]. 山地学报, 2005, 23(5): 55-60. [Hu Gang, Wu Yongqiu. Progress in the study of geomorphic threshold theory in channel (gully) Erosion [J]. Mountain Research, 2005, 23(5): 55-60.]

[6] 邓成龙, 袁宝印. 末次间冰期以来黄河中游黄土高原沟谷侵蚀-堆积过程初探[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 92-98. [Deng Chenglong, Yuan Baoyin. Processes of gully erosion and accumulation in the central Loess Plateau of China since the last interglacial [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(1): 92-98.]

[7] 黄骁力. 基于DEM的黄土沟谷地貌演化空代时研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019. [Huang Xiaoli. Space-for-time Substitution and Gully Evolution in the Chinese Loess Plateau[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019.]

[8] 王崔林. 黄土董志塬沟谷侵蚀发育空间分异特征及其综合治理模式研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020. [Wang Cuilin. Study on the Gully Spatial Differentiation Characteristics and Comprehensive Control Mode of Dongzhiyuan Area in the Loess Plateau [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.]

[9] 周毅, 王泽涛, 杨锋. 基于DEM的黄土沟谷横剖面形态特征研究——以宜君、延安、绥德为例[J]. 地理科学, 2020, 40(3): 455-465. [Zhou Yi, Wang Zetao, Yang Feng. Morphological characteristics of gully cross-section in the Loess Region based DEM: Taking Yijun, Yan'an and Suide as cases[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(3): 455-465.]

[10] 李晨瑞. 基于地形特征要素的黄土沟谷发育及区域差异性研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018. [Li Chenrui. Studies on Gully Development and Regional Difference in Loess Plateau Based on Topographic Feature Elements[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.]

[11] 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究[J]. 地理科学, 1986, 6(4): 340-347. [Jing Ke. A study on erosion on the Loess Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 1986, 6(4): 340-347.]

[12] 何雨, 贾铁飞, 李容全. 黄土丘陵区沟谷发育及其稳定性评价[J]. 干旱区地理, 1999, 22(2): 64-70. [He Yu, Jia Tiefei, Li Rongquan. Development of gullies and evaluation on their stability in Loess Hill Region[J]. Arid Land Geography, 1999, 22(2): 64-70.]

[13] 陈传康. 陇东东南部黄土地形类型及其发育规律[J]. 地理学报, 1956, 22(3): 223-231. [Chen Chuankang. Topographic types of loess in southeastern Longdong and their development pattern[J]. Acta Geographica Sinica, 1956, 22(3): 223-231.]
[14] 严宝文, 王涛, 马耀光. 黄土高原水蚀沟谷发育阶段研究[J]. 人民黄河, 2004, 26(6): 16-18. [Yan Baowen, Wang Tao, Ma Yaoguang. Study on the development stages of water erosion gullies in Loess Plateau[J]. Yellow River, 2004, 26(6): 16-18.]
[15] 袁爽, 许强, 赵宽耀, 等. 基于统计学的陇东地区沟谷分布及演化研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 172-180. [Yuan Shuang, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, et al. Gully distribution and evolution in East Gansu Province based on statistics[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 172-180.]
[16] Li C, Li F, Dai Z, et al. Spatial variation of gully development in the loess plateau of China based on the morphological perspective [J]. Earth Science Informatics, 2020, 13(4): 1103-1117.
[17] Wang R, Sun H, Yang J, et al. Quantitative evaluation of gully erosion using multitemporal UAV data in the southern black soil region of Northeast China: A case study[J]. Remote Sensing, 2022, 14(6): 1479.
[18] Wang T, He F, Zhang A, et al. A quantitative study of gully erosion based on object-oriented analysis techniques: A case study in Beiyanzikou catchment of Qixia, Shandong, China[J]. The Scientific World Journal, 2014, 15(2): 1-11.
[19] Thwaites R N, Brooks A P, Pietsch T J, et al. What type of gully is that? The need for a classification of gullies[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2022, 47(1): 109-128.
[20] Liu D, Liang X, Chen H, et al. A quantitative assessment of comprehensive ecological risk for a loess erosion gully: A case study of Dujiashi Gully, Northern Shaanxi Province, China[J]. Sustainability, 2018, 10(9): 3239.
[21] 孙利娟, 邢小军, 周德群. 熵值赋权法的改进[J]. 统计与决策, 2010, 26(21): 153-154. [Sun Lijuan, Xing Xiaojun, Zhou Dequn. Improvement of entropy assignment method[J]. Statistics & Decision, 2010, 26(21): 153-154.]
[22] 刘晓华, 许启发. 方差分析与虚拟变量回归模型的比较研究[J]. 统计与决策, 2012, 28(7): 34-38. [Liu Xiaohua, Xu Qifa. A comparative study of analysis of variance and dummy variable regression models[J]. Statistics & Decision, 2012, 28(7): 34-38.]
[23] 杜家菊, 陈志伟. 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6. [Du Jiaju, Chen Zhiwei. A method for implementing throughput analysis using SPSS linear regression [J]. Bulletin of Biology, 2010, 45(2): 4-6.]
[24] 刘畅, 周毅, 雷雪. 陕北黄土高原水蚀沟谷多维度侵蚀特征量化研究[J]. 地理科学进展, 2022, 41(4): 707-717. [Liu Chang, Zhou Yi, Lei Xue. Quantitative analysis of multi-dimensional erosion characterstics of waterworn gullies on the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. Progress in Geography, 2022, 41(4): 707-717.]
[25] 赵卫东, 周文怡, 马雷, 等. 基于势能信息熵的黄土小流域沟谷网络演化特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(6): 1-6. [Zhao Weidong, Zhou Wenyi, Ma Lei, et al. Study on evolution characteristic of valley network in small loess watershed based on potential energy information entropy[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(6): 1-6.]
[26] 刘洋, 李春阳. 植被因子对水土流失的影响[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(5): 95-99. [Liu Yang, Li Chunyang. The impact of plant factor on water and soil erosion[J]. World Sci-Tech R & D, 2005, 27(5): 95-99.]
[27] 杜峰, 程积民. 植被与水土流失[J]. 四川草原, 1999, 20(2): 7-12. [Du Feng, Cheng Jimin. Loss of water, erosion of soil and vegetation[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 1999, 20(2): 7-12.]
[28] 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 7-14, 50. [Xie Mingshu. A study on the soil mechanical role of tree roots in the stability of slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(3): 7-14, 50.]
[29] Jiao J, Zou H, Jia Y, et al. Research progress on the effects of soil erosion on vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 85-91.
[30] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被NPP变化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 584-593. [Yang Dan, Wang Xiaofeng. Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 584-593.]
[31] Renison D, Hensen I, Cingolani A M. Anthropogenic soil degradation affects seed viability in Polylepis australis mountain forests of central Argentina[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 196 (2-3): 327-333.
[32] Zhou Z C, Shangguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau Area of China[J]. Ecological Modelling, 2006, 198(1-2): 263-268.
[33] Zhao J, Vanmaercke M, Chen L, et al. Vegetation cover and topography rather than human disturbance control gully density and sediment production on the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2016, 274: 92-105.
[34] 田剑, 汤国安, 周毅, 等. 黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 622-628. [Tian Jian, Tang Guo'an, Zhou Yi, et al. Spatial variation of gully density in the Loess Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 622-628.]
[35] 姚文波. 历史时期董志塬地貌演变过程及其成因[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009. [Yao Wenbo. The Evolution Process of Dongzhi Loess Plateau Landform and Its Causes During the Historical Period [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2009.]
[36] 熊礼阳. 基于DEM的黄土地貌继承性研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015. [Xiong Liyang. DEM based Research on the Loess Landform Inheritance in the Loess Plateau of China[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.]
[37] 袁爽, 许强, 赵宽耀, 等. 陇东地区残塬分布规律及影响因素分

析[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 63−69, 108. [Yuan Shuang, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, et al. Analysis on distribution law and influencing factors of residual tableland in east Gansu Province[J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 63−69, 108.]

[38] Shahab H, Emami H, Haghnia G H. Effects of gully erosion on soil quality indices in northwestern Iran[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(6): 1317−1329.

[39] 姜琳, 王清晨, 王香增, 等. 鄂尔多斯盆地东南部中生界地层节理发育特征与古应力场[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1774−1790. [Jiang Lin, Wang Qingchen, Wang Xiangzeng, et al. Joint development and paleostress field in Mesozoic strata of the southeastern Ordos Basin.[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(5): 1774−1790.]

Evaluation of Dongzhi Loess Plateau Gully development based on combined entropy weight Rank-Sum Ratio method

CUI Shuai, XU Qiang, YUAN Shuang, PU Chuanhao, CHEN Wanlin, JI Xu

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: As a typical erosion geomorphic unit in the loess areas, gullies continuously erode loess surface under the action of internal and external forces, rainfall, and other factors. There are significant differences in the degree of development of gullies and valleys. Evaluating the development pattern of gullies and valleys can enhance the understanding of their organized, systematic formation and evolution. In addition, comprehensive quantitative indexes can facilitate the understanding of the longitudinal, lateral, and horizontal characteristics of gullies and valleys from multiple perspectives, which can help in the accurate and effective implementation of gully consolidation and loess protection projects, and reduce the constraints on development caused by this fragile geological environment. Evaluating the development of loess valleys is also crucial for exploring the intrinsic mechanism of valley formation, soil erosion, and guiding the ecological restoration of loess areas. In this study, ten quantitative indicators of gully development were selected based on the horizontal spatial, climatic, and point-line characteristics of the gullies, and used to establish an indexed evaluation model of the developmental stages of Dongzhi Loess Plateau gullies based on the efficient multi-factor comprehensive indexing evaluation capacity of the combined entropy-weight rank-sum ratio (RSR) method. Results showed that: (1) The highest weight of 16.08% could be attributed to the normalized vegetation index (NDVI) based on the entropy weighting method, followed by gully density (15.621%), both of which are important indicators for predicting the degree of gully development. (2) The combined entropy weighting RSR method could classify the 82 gullies of Dongzhi Loess Plateau into juvenile, youth, prime, and old age categories, with the percentage of gully area under the prime and old age categories accounting for 88.48% and 88.48%, respectively, while the eastern and northern parts of Dongzhi Loess Plateau exhibited more developed features and strong erosion on the loess surface. (3) The degree of gully development was highly correlated with the underlying palaeomorphology, tectonic geology, and loess thickness. (4) A significant model variance consistency test at $P<0.001$, with a linear regression R^2 fit of 0.986 was observed, which indicated a good performance of the model.

Keywords: loess; quantitative index system; combined entropy-weighted RSR method; graded evaluation of gully development; Dongzhi Loess Plateau